

鋼鉄材料における相界面析出に関する研究

著者	村上 俊夫
号	53
学位授与番号	4146
URL	http://hdl.handle.net/10097/42560

氏 名 村 上 俊 夫
 授 与 学 位 博士 (工学)
 学位授与年月日 平成21年3月25日
 学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
 研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属フロンティア工学専攻
 学位論文題目 鉄鋼材料における相界面析出に関する研究
 指 導 教 員 東北大学教授 古原 忠
 論文審査委員 主査 東北大学教授 古原 忠 東北大学教授 石田 清仁
 東北大学教授 粉川 博之 東北大学教授 千葉 晶彦

論文内容要旨

フェライト変態と同時に微細な炭化物が形成される相界面析出は鉄鋼材料の高強度化や鋼製部品製造の省工程化に有用な冶金現象であり、熱延鋼板や熱間鍛造用鋼などで活用されている。しかし、そのメカニズムは十分に明らかになっていない。さらに相界面析出の活用していくためには、形成メカニズムと kinetics を把握する必要がある。本研究では、相界面析出挙動の支配因子について検討し、その結果を元に相界面析出の形成シミュレーションを構築に取り組んだ。また、相界面析出を活用することで、鉄鋼材料の高強度化、疲労特性化、熱処理時の異常組織の防止といった技術課題の解決に取り組んだ。

第1章では、本研究の背景として鉄鋼材料における相界面析出の重要性と、相界面析出に関する従来知見について示した。特に相界面析出の形成メカニズムと速度論については、種々のモデルが提案されておりシート間隔や析出物のサイズを予測することができるようになっているものの、各モデルの妥当性について十分に検証されていない。そのため、モデルの妥当性の検証、そして、適切なモデルの提示が求められることを示した。

第2章では、相界面析出の析出挙動の支配因子を明確化するために、従来検討されていなかったフェライトの成長速度の影響について検討し、その結果から相界面析出のシート間隔の支配因子について議論した。S45Cに0.3mass%Vを添加した鋼を用いて、等温変態挙動を調査したところ、VCが相界面析出するフェライトは通常のフェライトと同様に炭素の体拡散律速で成長しており、等温変態が進行するにつれフェライトの成長速度が低下することがわかった。また、その際の相界面析出のシート間隔を評価した結果、フェライトの界面に近づくにつれて相界面析出のシート間隔が微細化していた (Fig.1)。フェライトの成長速度は界面移動距離に反比例して低下するので、界面に近いほどシート間隔が微細化したということは、言い換えると成長速度が低下するに従いシート間隔が微細化したといえ

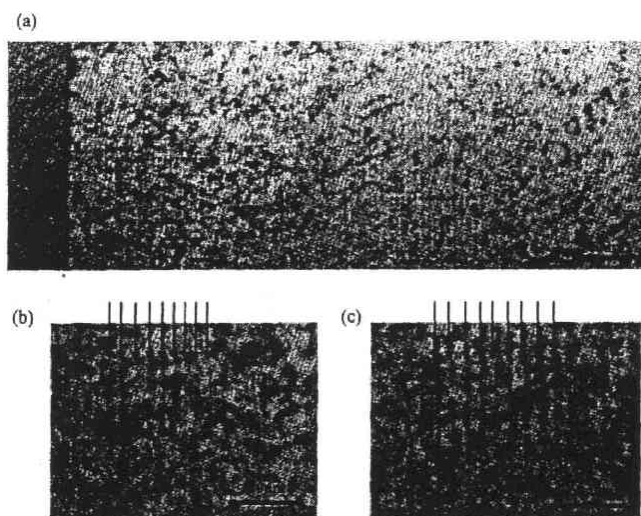


Fig.1 TEM micrograph of ferrite in the specimen held at 948K for 30s.

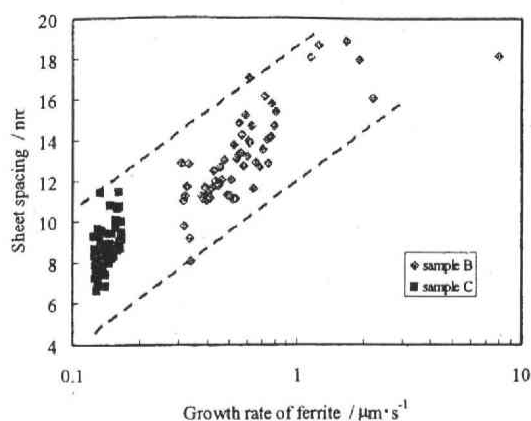


Fig.2 Change of the sheet spacing against the growth rate of isothermally transformed ferrite at 948K.

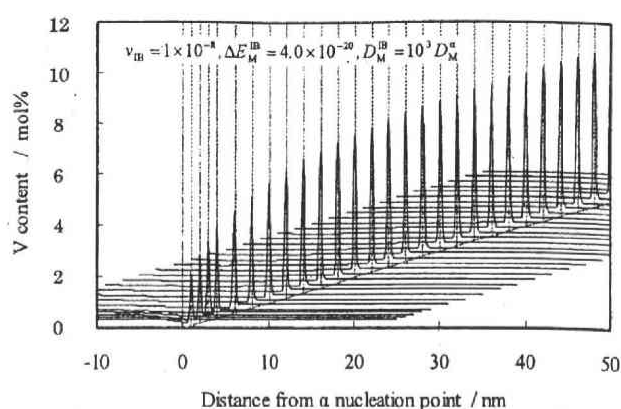


Fig.3 Influence of ferrite growth ratio on V segregation content predicted by solute drag model.

る (Fig.2). この現象を考慮するには、フェライトーオーステナイト界面でのV偏析が重要であり、界面偏析が進行することで界面上にVC析出が促進され、それが繰り返されることで相界面析出が形成されるというモデルを提示した。

第3章では、Vのオーステナイトーフェライト界面での偏析挙動が相界面析出の形成に寄与するという仮説に基づき、界面偏析の非定常状態の予測技術を構築し、この技術を用いることで相界面析出の予測方法について取り組んだ。オーステナイトーフェライト界面

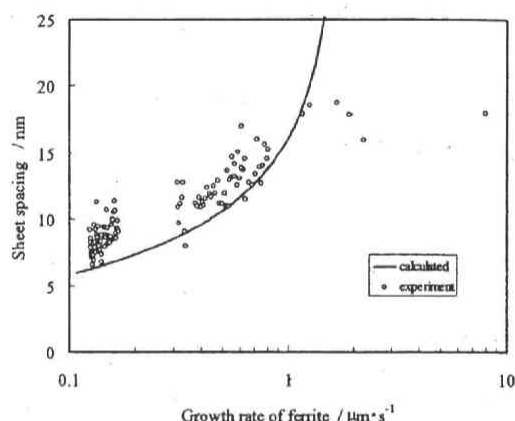


Fig.4 The change of sheet spacing against ferrite growth rate calculated with the interphase precipitation model proposed in this study.

での偏析についてはCahnの粒界偏析モデルに基づいた差分計算式を導出し、かつ、相互作用エネルギーと界面拡散係数を空間微分しても連続性を保つように設定することで数値解析を行うことを可能とした。偏析計算を行う上で重要なパラメータである界面とVの相互作用エネルギー、その結果、界面偏析の非定常状態を予測できることを示した(Fig.3)。フェライトの成長はZenerの1次直線近似モデル、析出を古典的核生成理論を用いて相界面析出発生時の臨界条件として偏析したV量が析出により消費されるV量と等しくなる時に析出が発生すると仮定することで、相界面析出挙動のシート間隔を予測できることを示した(Fig.4)。

第4章では熱間鍛造非調質鋼の高強度化に対して、V添加量を増加させても0.4%V付近を限界に強化量が飽和する原因の解明と、高強度化方法について検討した。一般的な熱間鍛造用部材の冷却速度である2°C/sでは、V添加量増加によりフェライト中に相界面析出で形成されたVCが微細化しフェライト硬さは向上するが、析出強化されないベイナイトが形成されるので、強化量が飽和することを明らかにした。また、ベイナイトの形成を防止するには、冷却速度を低下させパーライトを促進することが有効であることを示した。この時の冷却速度の低下でフェライト中の析出強化量を低下した。その挙動については第3章で導出した相界面析出シミュレーションモデルで考慮できた(Fig.5)。また、フェライトの高強度化とパーライト変態を促進するために、650°Cまでを急冷、その後は徐冷するステップ冷却が有効であることを示した。

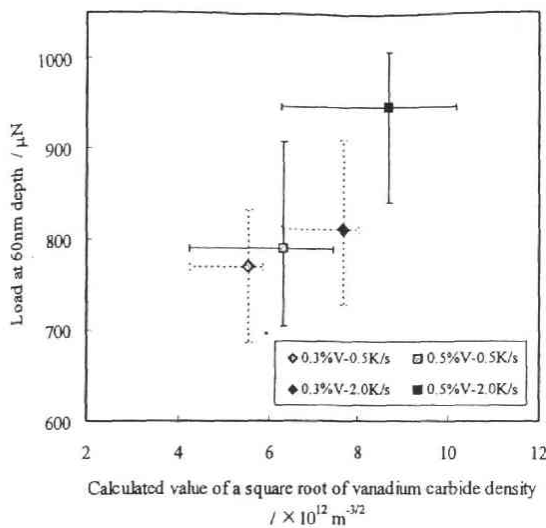


Fig.5 Relationship between calculated VC density and micro-hardness of ferrite measured by nano indenter.

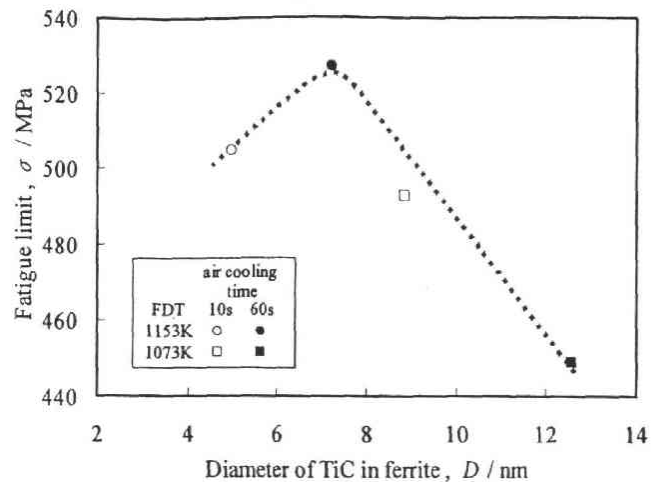


Fig.6 Relationship between calculated VC density and micro-hardness of ferrite measured by nano indenter.

第5章では熱延鋼板の疲労特性改善のために、Ti添加高強度熱延複相組織鋼板においてフェライト中のTiC相界面析出挙動と、得られたTiCサイズが疲労特性に及ぼす影響について検討した。Ti添加熱延鋼板のフェライト中の析出物は圧延温度の低温化と650℃付近の空冷により粗大化し、これがフェライト変態温度の上昇や、形成された析出物の粗大化によることを示した。また、フェライト中のTiCサイズが約7nmの時に、疲労限は最大化し、これが微細な析出物は疲労試験中に転位にCuttingされ強化能を失うために疲労限に対してはCuttingされない析出物による析出強化量が重要であり、その値が約7nmで最大化するためであることを示した(Fig.6)。

第6章では浸炭温度の高温化による熱処理時間短縮のために、熱間圧延や熱間鍛造後の冷却過程で相界面析出で形成されるNbCの存在形態が、その後の浸炭処理中の異常粒成長に及ぼす影響について検討した。高温保持前にNbが固溶させる方が析出させるよりも異常粒成長の抑制効果が大いことがわかった。これは、固溶している場合は浸炭時の加熱過程でNbCが析出することでマトリックスとの整合性がよくなり、界面エネルギーが低下して粗大化速度が低下するためと考えられる。また、高温保持前に析出している場合は、大きすぎるとピン止め力不足、小さすぎると析出物の粗大化によるピン止め粒子の減少により異常粒成長が促進されるため、異常粒成長防止には適切なサイズがあることを示した(Fig7)。

以上のように、本研究では鉄鋼材料中の相界面析出挙動の支配因子の明確化と相界面析出シミュレーションの構築を通して、そのkineticsを明らかにした。また、相界面析出を活用することで高強度化、高疲労特性化、異常粒成長抑制など実用鋼における技術課題を解決でき、自動車用部品の小型化・軽量化、製造プロセスの省エネルギー化に寄与できることを示した。これらの知見は相界面析出を活用した他の鉄鋼材料を用いた製品においても活用することができ、鉄鋼材料の発展に寄与できる。

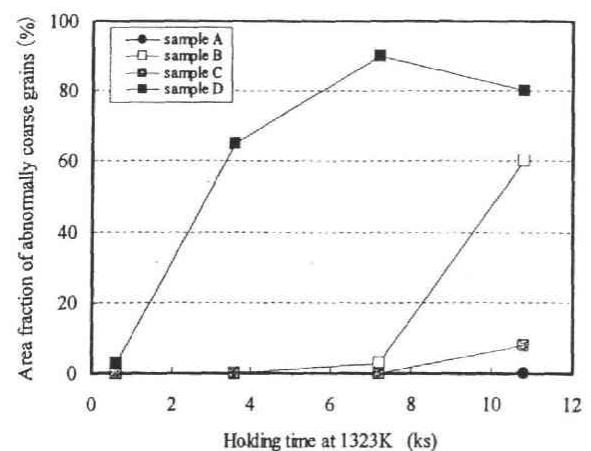


Fig.7 Area fraction of abnormally coarse grains against quasi-carburizing time at 1323K
Sample A: No precipitation treatment
Sample B: 1173K×0.6ks
Sample C: 1173K×54ks
Sample D: 1273K×54ks

論文審査結果の要旨

鉄鋼の相界面析出は、高温のオーステナイト状態からの冷却で析出物をシート状に微細分散させることができる現象であり、熱間鍛造用鋼の非調質化や熱延鋼板の高強度化に活用されている。今後さらなる鋼材の高強度化ニーズに対応するためには、この特異な析出現象を解明しその制御技術の高度化が必要不可欠である。

本研究では、鉄鋼の相界面析出制御技術の確立に必要な知見を得るため、相界面析出挙動に及ぼす影響因子を析出の速度論の面から検討し、その知見を活用して鉄鋼の高強度化および製造工程の省エネルギー化を達成することを目的としており、全編7章よりなる。

第1章は、緒言であり、本論文の背景と目的を述べている。

第2章では、典型的な相界面析出が観察されるV添加中炭素鋼を用いて等温保持中の相界面析出のシート間隔の変化挙動を測定し、フェライト成長速度が相界面析出のシート間隔に及ぼす影響を明らかにするとともに、既存の相界面析出モデルの妥当性の検討を行い、Vの界面偏析がこの現象の支配因子であることを見出している。

第3章では、第2章の知見を元に、連続的に速度が変化するオーステナイト→フェライト界面移動に伴う非定常な界面偏析濃度の変化を考慮した相界面析出シミュレーションモデルの構築を行っている。

第4章では、コンロッドやハブといった熱間鍛造部品の高強度化に取り組んでいる。従来、高強度化のためV添加量を増加させても強化量が増加しないと言われていたのに対して、この強化量の飽和原因について変態組織および相界面析出挙動の変化の観点から解明するとともに、高強度化のための組織制御指針について検討している。

第5章では、自動車用の足回り部品に用いられる複相組織熱間圧延鋼板の疲労特性および成形性の改善に取り組み、TiCの析出強化により疲労特性が改善できることを示している。また、特性改善に最も適した析出形態およびその実現のための熱延後冷却における相界面析出挙動の制御方法について検討している。

第6章では、歯車などに用いられる浸炭処理の省エネルギー化を目的に、高温浸炭時の異常粒成長防止について検討し、異常粒成長防止に適切な析出物の制御指針を提示するために、初期の析出物の存在状態を変化させ、それを高温に加熱したときの結晶粒および析出物の変化挙動を解明している。また、その結果を元に、その前工程において相界面析出の制御による適切な析出物分散の達成方法について考察している。

第7章は本研究の結論である。

以上のように、本論文は鉄鋼材料中の相界面析出挙動の支配因子の明確化と相界面析出の形成シミュレーションの構築を通して、その速度論を明らかにした。また、相界面析出を活用することで高強度化、高疲労特性化、異常粒成長抑制といった実用鋼における技術課題を解決することができ、自動車用部品の小型化・軽量化、製造プロセスの省エネルギー化に寄与できることを示した。これらの知見は相界面析出が起こる他の鉄鋼材料においても活用することができ、今後の鉄鋼材料の発展に寄与するところが多い。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。